

УДК 551.5

*На правах рукописи*



Аухадеев Тимур Ринатович

**БАРИКО-ЦИРКУЛЯЦИОННЫЙ РЕЖИМ ПРИВОЛЖСКОГО  
ФЕДЕРАЛЬНОГО ОКРУГА**

Специальность 25.00.30 – метеорология,  
климатология, агрометеорология

**АВТОРЕФЕРАТ**

диссертации на соискание ученой степени  
кандидата географических наук

Казань - 2015

Работа выполнена на кафедре метеорологии, климатологии и экологии атмосферы Института экологии и природопользования Казанского (Приволжского) федерального университета

**Научный руководитель: Переведенцев Юрий Петрович**

доктор географических наук, профессор, заведующий кафедрой метеорологии, климатологии и экологии атмосферы ФГАОУ ВО «Казанский (Приволжский) федеральный университет»

**Официальные оппоненты: Сидоренков Николай Сергеевич**

доктор физико-математических наук, старший научный сотрудник, ФГБУ "Гидрометцентр России", отдел глобального анализа и прогноза погоды, главный научный сотрудник

**Ветров Андрей Леонидович**

кандидат географических наук, проректор по научной работе и инновациям, доцент кафедры метеорологии и охраны атмосферы Пермского государственного национального исследовательского университета

**Ведущая организация:**

ФГБОУ ВПО «Саратовский государственный университет имени Н.Г. Чернышевского»

Защита состоится 17 декабря 2015 г. в 15<sup>00</sup> часов на заседании диссертационного совета Д 212.081.20 в Казанском (Приволжском) федеральном университете по адресу: 420097, г. Казань, ул. Товарищеская, д. 5, Институт экологии и природопользования КФУ, ауд. 321.

С диссертацией можно ознакомиться в Научной библиотеке им. Н.И.Лобачевского ФГАОУ ВО «Казанский (Приволжский) федеральный университет». Электронная версия автореферата размещена на официальном сайте Казанского (Приволжского) федерального университета (<http://kpfu.ru/>). Ваши отзывы на автореферат просим направлять по адресу: 420008, г. Казань, ул. Кремлевская, 18, Казанский (Приволжский) федеральный университет, отдел аттестации научно-педагогических кадров. Факс: (843) 2337867. E-mail: [1aotdel@kpfu.ru](mailto:1aotdel@kpfu.ru).

Автореферат разослан «29» октября 2015 г.  
Ученый секретарь диссертационного совета,  
кандидат географических наук, доцент



Ю.Г.Хабутдинов

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

### *Актуальность темы исследования*

В настоящее время в связи с глобальным потеплением климата происходят заметные изменения в структуре и динамике метеорологических полей: температуры воздуха, атмосферного давления, скорости ветра и др., что необходимо учитывать при моделировании и прогнозировании атмосферных процессов различных масштабов – от синоптических до глобальных. Важное значение придается изучению региональных изменений метеорологических величин и физических механизмов этих изменений, роли атмосферной циркуляции. В последние годы в прикладной климатологии особое внимание обращается на использование климатических ресурсов в качестве возобновляемых источников энергии. В связи с техническим прогрессом всё более перспективным является использование ветроэнергетического потенциала для получения электроэнергии.

Актуальность данной работы обусловлена недостаточной изученностью происходящих изменений атмосферного давления и скорости ветра в условиях современного потепления климата на территории Приволжского федерального округа (ПФО), необходимостью построения обобщающей эмпирико-статистической модели пространственно-временного распределения метеовеличин в регионе и оценки возможностей использования её ветроэнергетического потенциала.

### Цель работы:

Изучение пространственно-временных изменений полей давления воздуха и скорости ветра на территории ПФО на фоне происходящих изменений барического поля и циркуляции атмосферы Северного полушария в период 1948-2013 гг.

### Для достижения поставленной цели решались следующие задачи:

- Анализ пространственно-временных изменений давления воздуха на уровне моря над территорией Северного полушария в целом, в особенности в широтной зоне 30-70°с.ш. и в Приволжском федеральном округе;
- Выявление роли атмосферной циркуляции в изменениях атмосферного давления и температуры воздуха;
- Изучение статистических связей между изменениями атмосферного давления с одной стороны, полями температуры, атмосферных осадков и другими геофизическими явлениями с другой;
- Изучение ветрового режима на территории ПФО в условиях изменений современного климата;

- Оценка ветроэнергетического потенциала ПФО и тенденций его изменений в последние десятилетия.

Объектом исследования является барический и ветровой режим ПФО и Северного полушария в целом.

Предметом исследования являются:

- пространственно-временные показатели барико-циркуляционного режима;
- временные тенденции и долговременные колебания в рядах атмосферного давления, температуры воздуха и скорости ветра на территории ПФО;
- связи атмосферного давления, температуры воздуха и скорости ветра с циркуляцией атмосферы.

Методы исследования

В работе использованы современные программные средства. Оценки региональных изменений климата на территории ПФО получены на фоне изменений глобального климата с использованием статистических методов, корреляционного и тренд-анализа. Пространственный анализ полей метеовеличин и их визуализация выполнялась посредством ГИС-технологий. Достоверность результатов оценивалась с помощью критерия Стьюдента.

Методологической основой послужили труды известных российских и зарубежных ученых, разработавших научные основы метеорологии, фундаментальной и прикладной климатологии, физики атмосферы.

Информационной базой исследования явились данные приземных метеорологических наблюдений по территории ПФО с 1966 по 2009 гг. (ФГБУ «ВНИИГМИ-МЦД», г. Обнинск); данные по давлению и температуре воздуха на метеорологической станции Казань, университет (1900 – 2013 гг.); данные NCEP/NCAR реанализа (<http://www.esrl.noaa.gov/psd/data/gridded/>) атмосферного давления на уровне моря, температуры воздуха, компонент скорости ветра в узлах регулярной географической сетки с шагом по широте и долготе 2,5 на 2,5° (1948 – 2013 гг.); индексы атмосферной циркуляции NAO, AO, SCAND, EA (1966 – 2013 гг.).

Научная новизна исследования заключается в следующем:

- Выявлены закономерности пространственно-временных изменений атмосферного давления и скорости ветра ПФО в период 1948-2013гг., происходящих на фоне глобального потепления;

- Впервые для ПФО дана комплексная оценка воздействия атмосферной циркуляции, характеризующейся телеконнекционными индексами, на атмосферное давление и скорость ветра;
- Впервые для региона построены композиты полей атмосферного давления и температуры воздуха при различных фазах индексов атмосферной циркуляции;
- Выявлены взаимосвязи между полем атмосферного давления и другими метеорологическими полями (температура воздуха, атмосферные осадки);
- Рассчитан ветроэнергетический потенциал (ВЭП) округа, который варьирует и полностью определяется структурой поля ветра.

### Практическая значимость работы

Результаты исследований могут быть использованы:

- как справочный материал о режиме атмосферного давления и ветра на территории ПФО и при тестировании региональных климатических моделей;
- при оценке природного ветроэнергетического потенциала региона;
- при подготовке научного отчета по гранту РФФИ 15-05-06349 «Построение региональной модели по диагнозу и прогнозу современных изменений климата и их социально-экологических последствий (на примере Приволжского федерального округа)»;
- используются в учебном процессе на кафедре метеорологии, климатологии и экологии атмосферы КФУ при чтении лекций по курсам «Теория общей циркуляции атмосферы», «Климатология».

### На защиту выносятся следующие положения:

1. Климатические показатели, характеризующиеся динамикой барико-циркуляционного режима на территории Северного полушария и ПФО, связаны с процессом современного глобального потепления;
2. Выявленная структура композитов полей атмосферного давления и температуры воздуха для территории ПФО определяется динамикой фаз индексов атмосферной циркуляции Северного полушария;
3. Выявленные статистические связи между полями метеорологических величин свидетельствуют о сложном физическом механизме взаимодействия в земной атмосфере и необходимости комплексного изучения процессов;
4. Оценка трендов атмосферного давления и скорости ветра в период 1948-2013гг. как показателей изменения климата региона на фоне изменяющихся показателей макроциркуляции;
5. Оценка ветроэнергетического потенциала ПФО как климатического ресурса региона.

**Обоснованность и достоверность** результатов подтверждается следующим:

- использованные в работе подходы базируются на современных научных положениях и количественных методах;
- результаты соответствуют физическим представлениям об изучаемых явлениях и согласуются с наблюдениями;
- использованием известных статистических критериев для оценки достоверности вычисляемых показателей.

**Личный вклад соискателя.** Соискатель совместно с научным руководителем определил цель и задачи исследования. Все основные результаты, вынесенные на защиту, их интерпретация получены автором. Обработка эмпирических данных и их статистический анализ выполнены по алгоритмам и программам, разработанным автором работы.

#### **Апробация работы:**

Основные и промежуточные результаты исследований по теме диссертационной работы докладывались автором на XVI-й Международной конференции молодых ученых «Состав атмосферы. Атмосферное электричество. Климатические эффекты» (Звенигород, 2012 г.); Международной научной конференции по региональным проблемам гидрометеорологии и мониторинга окружающей среды (Казань, 2012 г.); VIII-й Международной научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых «Молодые ученые – географической науке» (г. Киев, 2012 г.); II-й Всероссийской научной конференции с международным участием «Окружающая среда и устойчивое развитие регионов» (Казань, 2013 г.); XVIII-й Всероссийской школе-конференции молодых ученых «Состав атмосферы. Атмосферное электричество. Климатические процессы» (Борок, 2014г.); XV-м международном симпозиуме «Энергоресурсоэффективность и энергосбережение» (Казань, 2015г.); Международной научной конференции «Проблемы гидрометеорологического обеспечения хозяйственной деятельности в условиях изменяющегося климата» (Минск, 2015); XIX-й Международной школе-конференции молодых ученых «Состав атмосферы. Атмосферное электричество. Климатические процессы. САТЭП-2015» (Туапсе, 2015г.); Международной научно-практической конференции «География и регион» (Пермь, 2015г.); итоговых научных конференциях и семинарах кафедры метеорологии, климатологии и экологии атмосферы КФУ (2010 – 2015 гг.).

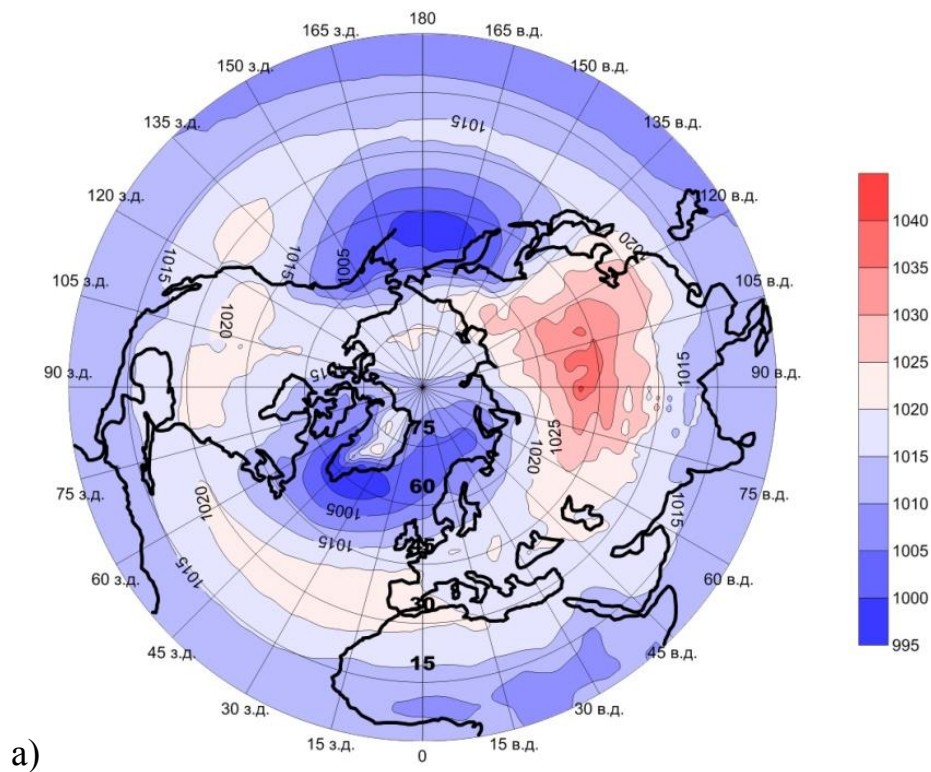
**Публикации.** По теме диссертации опубликовано 12 научных работ, в том числе 4 работы опубликованы в журналах, рекомендованных ВАК для кандидатских и докторских диссертаций.

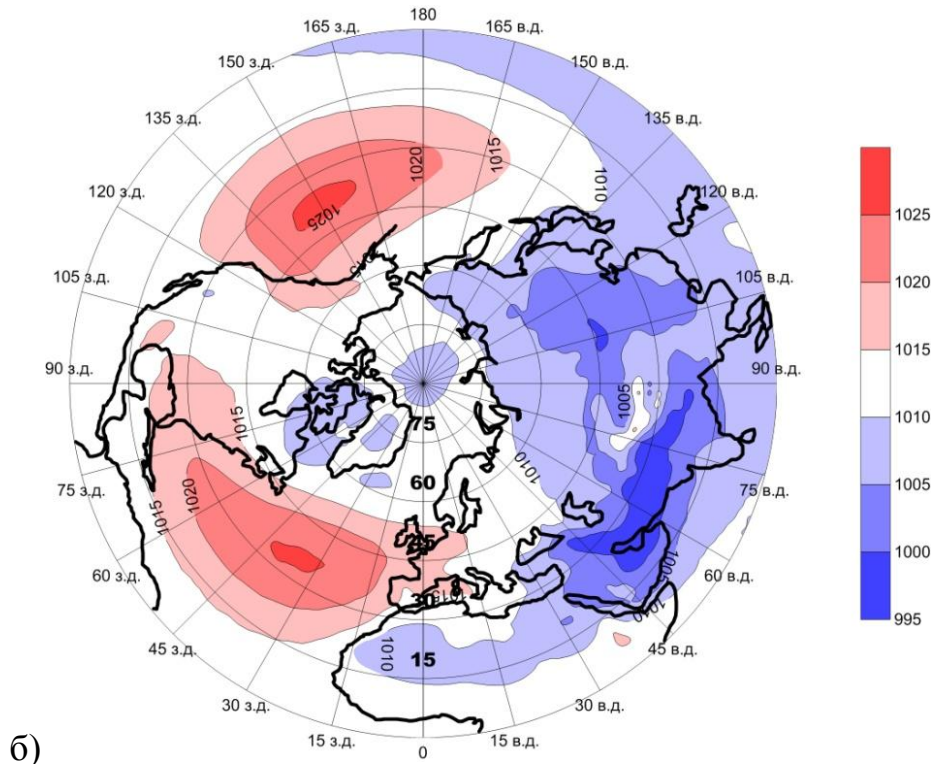
**Структура и объем диссертации.** Работа состоит из введения, четырех глав, заключения и списка литературы. Общий объем работы 193 страницы, включая 77 рисунков, 53 таблицы и 5 приложений. Список цитируемой литературы насчитывает 152 источника.

## ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

**Во введении** обоснована актуальность выбранной темы, сформулированы цель и задачи исследования, определены объект и предмет изучения. Представлены основные положения, выносимые на защиту, а также перечислены основные методы исследований, использованные в работе.

**В первой главе** рассмотрены основные черты и динамика барико-циркуляционного режима в атмосфере Северного полушария с использованием архива данных реанализа NCEP/NCAR за период 1948-2013гг. Построенные карты распределения среднего многолетнего атмосферного давления (АД) на уровне моря в центральные месяцы сезонов наглядно отражают сезонные преобразования структуры барического поля и в целом соответствуют известным картам давления (рис. 1).





б)

Рис. 1. Среднее многолетнее распределение атмосферного давления на уровне моря (1948-2013гг): а-январь, б-июль

Для выявления широтной зависимости в полях метеовеличин были построены зональные разрезы температуры воздуха и атмосферного давления. Так, для температуры зональное распределение, характеризующееся монотонным повышением температуры от полюса к экватору и максимальным контрастом (полюс-экватор) зимой обусловлено характером инсоляции (рис. 2).

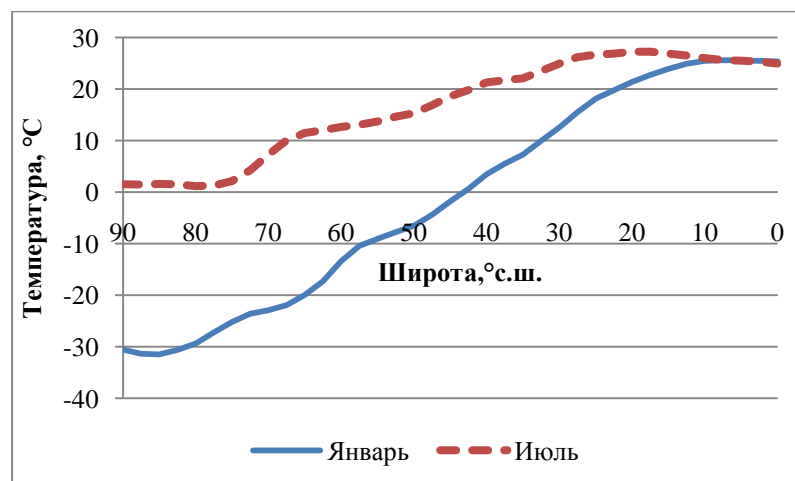


Рис. 2. Распределение средней зональной температуры воздуха ( $^{\circ}\text{C}$ ) у земли в Северном полушарии (1948-2013гг.)



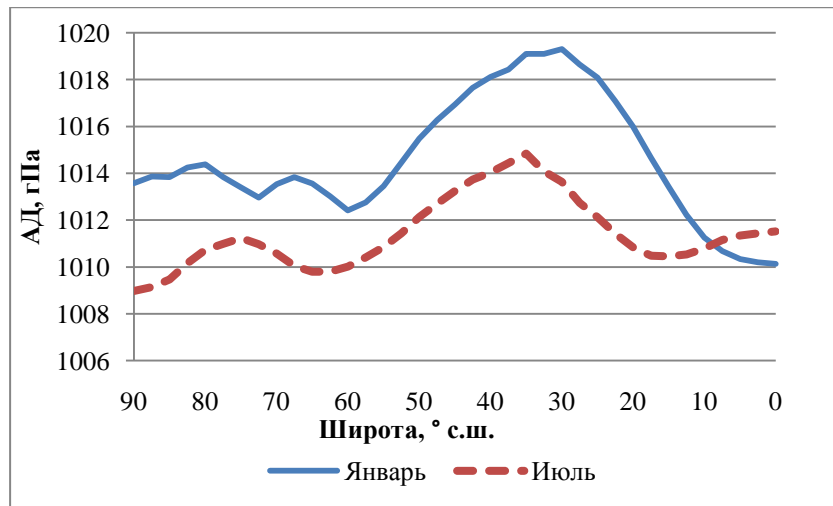


Рис. 3. Распределение среднего зонального давления (гПа) в Северном полушарии (1948-2013гг.)

Согласно рис. 3, атмосферное давление возрастает от экваториальной зоны к субтропикам, где формируется его экстремум, далее в направлении к Северному полюсу оно уменьшается и достигает своего минимума в июле (1009 гПа).

Особенности годового хода атмосферного давления удобно анализировать путем построения карты изоплет, представляющих собой отклонения среднеширотного давления конкретного месяца от годового значения.

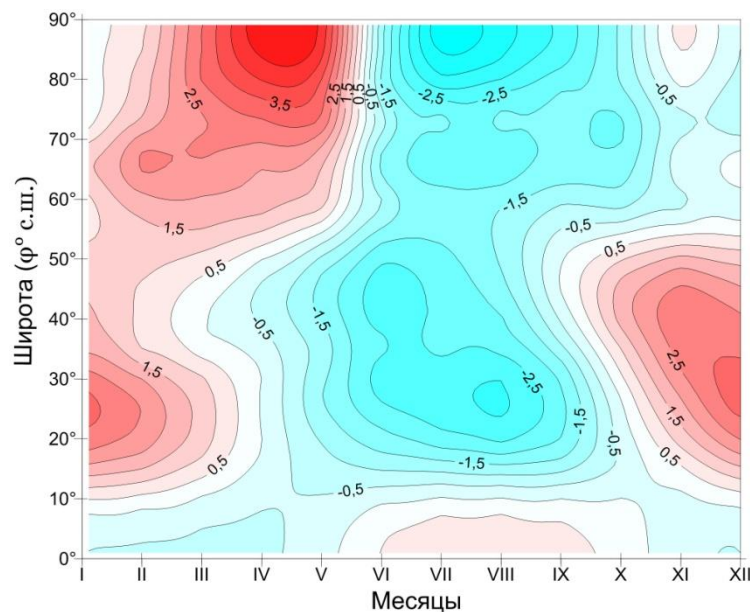


Рис.4. Изоплеты отклонений месячного среднего широтного атмосферного давления от годового

Из рис. 4 следует, что в зоне субтропических широт перепады давления от летних к зимним месяцам достигают 6 гПа (летом аномалия давления -3 гПа, зимой 3 гПа); в полярных широтах этот перепад усиливается до 8 гПа. При этом наиболее интенсивно падает давление с мая по июнь; в субтропиках наиболее интенсивно давление растет с сентября по ноябрь.

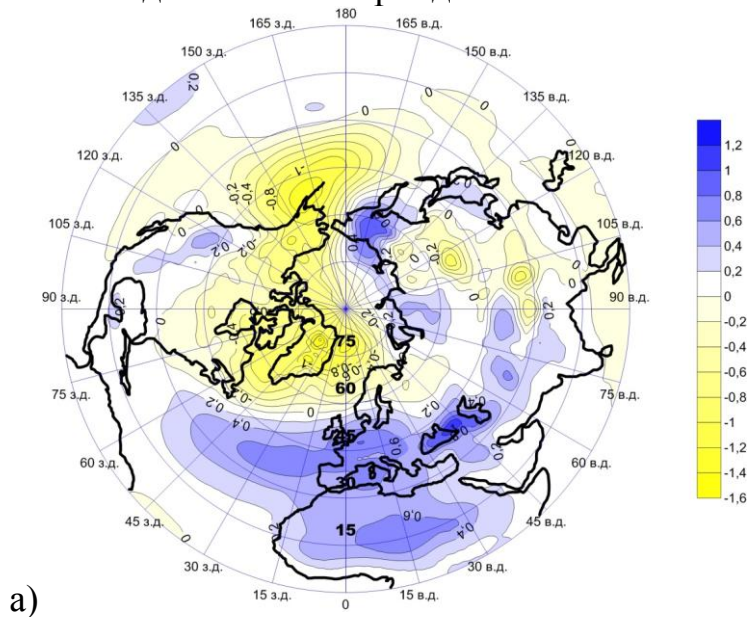
Для характеристики временной изменчивости давления рассчитывался ряд статистических параметров, таких как среднее квадратическое отклонение  $\sigma$  (СКО), показатели аномальности.

Анализ построенных карт показывает, что величина  $\sigma$  меняется в годовом ходе от минимальных значений летом до максимальных зимой, достигающих 9,0-9,5 гПа в районах расположения депрессий (Исландской и Алеутской).

По среднемесячным значениям АД за период 1948-2013 гг. были вычислены коэффициенты наклона линейного тренда значений давления (гПа/10лет) с целью оценки тенденции изменения барического и термического поля во времени (рис. 5), согласно которому в значительной части внетропических широт западного полушария и зимой и летом в период с 1948 по 2013 гг. давление понижалось. Более активно этот процесс происходил в зимний период. Во внетропических широтах Евразии изменения давления, аппроксимируемые линейной функцией, зимой и летом имеют противоположную направленность.

Основные очаги понижения давления в зимний период занимают северную и северо-западную часть Северной Атлантики, Гренландию и острова Канадского архипелага, они располагаются также в восточной Евразии и в районе Алеутских островов. Области положительных значений КНЛТ в этот сезон занимают всю Западную Европу, Кавказ и Закавказье и простираются вдоль 35° с.ш. до 90° в.д. Кроме того, в линейном приближении, давление увеличивается также в центре северной части Африки.

Летом в линейном приближении давление росло практически на всей территории Евразии, причем основной очаг положительных значений КНЛТ располагается в области восточного центра Азиатской депрессии в Монголии к югу от оз. Байкал. Второй очаг положительных значений КНЛТ давления располагается в северной Африке. На остальной части полушария результирующее изменение давления за период с 1948 по 2013 гг. невелико.



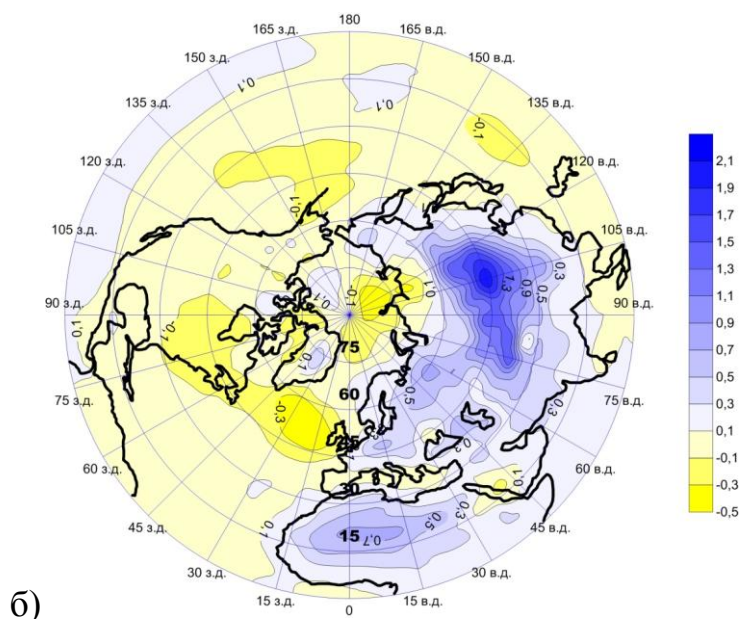


Рис. 5. Коэффициенты наклона линейного тренда давления приведенного к уровню моря (гПа/10 лет) за период с 1948- 2013 гг. в январе и июле

В целях выявления дальних (телеконнекционных) связей рассчитывались коэффициенты корреляции между температурой воздуха и атмосферным давлением в 54 узлах на территории ПФО и рядами индекса северо-атлантического колебания (NAO) в периоды активной (1978-1998гг.) и слабо выраженной (1948-1967гг.) фазы Эль-Ниньо. Результаты расчетов приведены в табл. 1, согласно которым в период более активной фазы ЭНЮК связи между NAO и термодинамическими параметрами ПФО усиливаются, что свидетельствует о влиянии ЭНЮК на NAO и, следовательно, на процессы в ПФО.

Таблица 1

Коэффициенты линейной корреляции между индексами NAO и рядами давления (P) и температуры (T), осредненных по ПФО

| 1978-1998гг.      |       |       |       |       |       |       |       |      |       |       |       |       |
|-------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|------|-------|-------|-------|-------|
|                   | I     | II    | III   | IV    | V     | VI    | VII   | VIII | IX    | X     | XI    | XII   |
| $r(\text{NAO};P)$ | -0,60 | -0,49 | -0,68 | 0,17  | 0,16  | -0,41 | 0,29  | 0,01 | -0,20 | -0,28 | 0,11  | -0,01 |
| $r(\text{NAO};T)$ | 0,76  | 0,53  | 0,50  | 0,06  | -0,06 | -0,29 | 0,12  | 0,10 | 0,27  | 0,11  | 0,07  | 0,19  |
| 1948-1967гг.      |       |       |       |       |       |       |       |      |       |       |       |       |
| $r(\text{NAO};P)$ | -0,56 | -0,27 | -0,51 | -0,16 | -0,19 | -0,14 | -0,01 | 0,31 | -0,10 | -0,18 | 0,00  | 0,21  |
| $r(\text{NAO};T)$ | 0,32  | 0,27  | 0,06  | -0,40 | -0,15 | -0,18 | 0,06  | 0,21 | -0,04 | 0,36  | -0,11 | 0,08  |

Поскольку индексы циркуляции атмосферы типа NAO имеют макромасштабную природу, для оценки их влияния на планетарные процессы. вычислялись коэффициенты корреляции между значениями индекса NAO с одной стороны и среднемесячными значениями температуры воздуха и атмосферного давления в узлах регулярной сетки по всему СП, с другой. В качестве примера, на рис. 6 приводятся рассчитанные корреляционные поля для

давления и температуры (январь), имеющие очаговую структуру, детальный анализ которых представлен в работе.

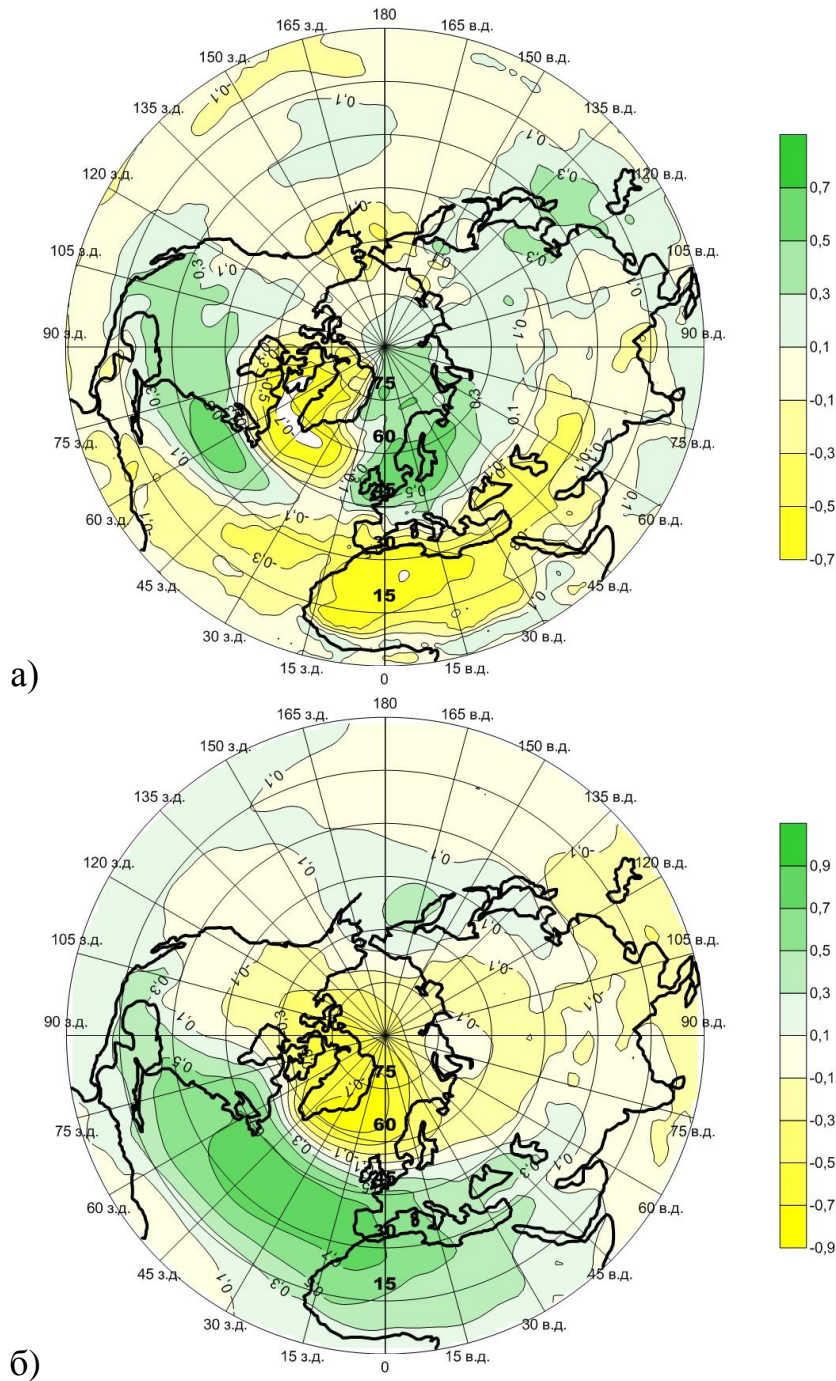


Рис. 6. Коэффициенты линейной корреляции рядов температуры (а) и давления (б) и индекса NAO (1948-2013гг.). Январь

Как и следовало ожидать, наибольшие по абсолютной величине значения  $r$  соответствуют расположению центров действия атмосферы.

**Вторая глава** посвящена изучению режима атмосферного давления в ПФО в период 1948-2013гг. Для описания барического режима территории округа рассчитывались среднегодовые и ежемесячные многолетние нормы



атмосферного давления за исследуемый период, оценивались показатели абсолютной изменчивости, а также другие статистические показатели временных рядов.

Пространственное распределение среднего атмосферного давления носит неоднородный характер. Барическое поле в течение года испытывает перестройку. Для холодного времени года характерно повышенное давление на юго-востоке (влияние Сибирского антициклона) и низкое на северо-западе округа (влияние циклонической активности) (рис. 7а). Такая картина распределения среднемесячного атмосферного давления сохраняется для периода с ноября по февраль. Начиная с апреля, изобары принимают зональный характер, а максимальные значения АД отмечаются на севере округа. Для теплого сезона- ситуация иная: поле атмосферного давления становится малоградиентным, наблюдается незначительное повышение давления с востока на запад, возможно, под влиянием отрога Азорского антициклона, минимум АД наблюдается в восточной части территории округа, максимум же в западной, при меридиональной направленности изобар (рис. 7б).

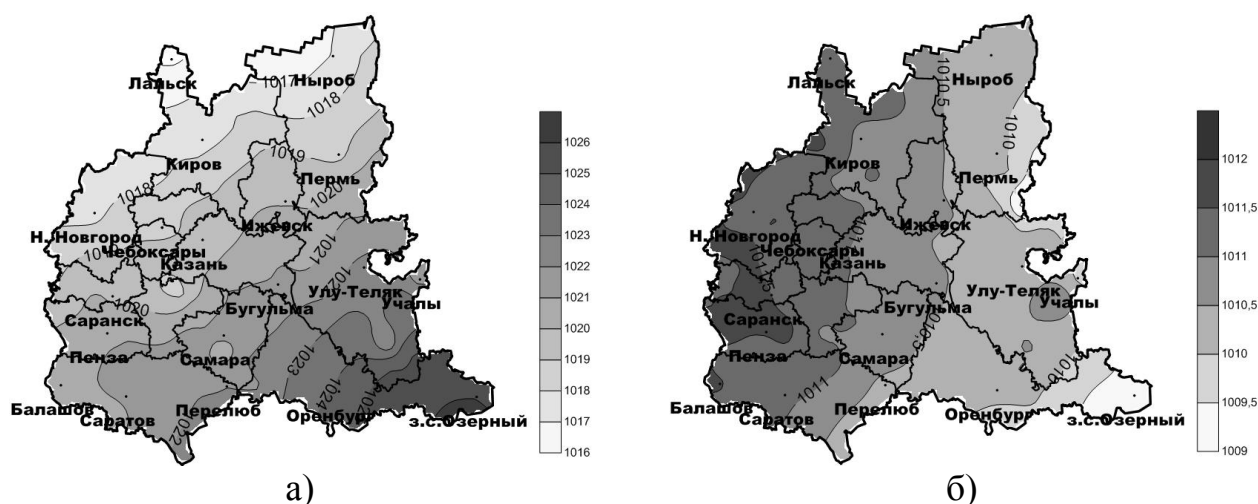


Рис. 7. Распределение среднего многолетнего атмосферного давления (гПа) в ПФО на уровне моря: а- январь; б- июль

Корреляционный анализ показывает, что данные реанализа в узлах сетки тесно связаны с данными 183 метеостанций, что позволяет их использовать в расчетах.

Одной из характеристик неперiodических изменений АД является абсолютная изменчивость средних месячных значений ( $A$ ), которая рассчитывается как разность наибольшего и наименьшего значений среднего месячного давления данного месяца за многолетний период. Данная характеристика имеет хорошо выраженный годовой ход, принимая максимальное значение в холодное время года и минимальное в теплое. В табл.2 представлены результаты расчетов по 183 станциям, осредненных по всей территории ПФО.

Абсолютная изменчивость средних месячных значений давления (гПа),  
осредненная по ПФО за период 1966-2009гг.

|        | Месяцы |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      | СРЕДНЕЕ |
|--------|--------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|---------|
|        | I      | II   | III  | IV   | V    | VI   | VII  | VIII | IX   | X    | XI   | XII  |         |
| А, гПа | 30,8   | 34,4 | 27,3 | 13,8 | 13,0 | 11,3 | 11,0 | 11,3 | 14,7 | 26,0 | 27,5 | 28,8 | 20,8    |

Для оценки относительной устойчивости барического режима, рассчитывалась величина коэффициента вариации для каждой из станций и всех месяцев года. Небольшие значения  $C_v$  (0,2-0,8%) свидетельствуют о достаточно однородном распределении давления по территории ПФО.

Для выявления пространственной однородности поля АД рассчитывались коэффициенты корреляции ( $r$ ) между центральной станцией округа (Чистополь) и всеми остальными станциями. Результаты картированы. Они показывают, что пространственные связи в поле давления очень высоки:  $r$  меняется от 0,8 до 1,0 в течение года. Всё это свидетельствует об однородности и крупномасштабности процесса.

Кроме того, пространственная изменчивость поля атмосферного давления оценивалась по формуле:

$$\sigma^2(P) = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (P_i - \bar{P})^2, \quad (1)$$

где  $P_i$  - среднемесячное давление на  $i$ -той станции,  $\bar{P}$  - давление осредненное по всем станциям округа в конкретный месяц,  $N$  - число станций.

Выявилось, что в течение года величина  $\sigma^2$  меняется от 0,2 в летний период до 8 (гПа)<sup>2</sup> в зимний.

Установлена также зависимость атмосферного давления от географических координат местности.

Оценивались межгодовые колебания атмосферного давления на территории округа, достигающие в ряде случаев в зимний период до 40 гПа.

Кроме того, межгодовые колебания атмосферного давления осредненного по ПФО хорошо согласуются с изменениями широты положения осевой изогипсы планетарной высотной фронтальной зоны (на долготе 50° в.д.). Коэффициенты корреляции, характеризующие эту связь, во все месяцы статистически достоверны при 5%-ном уровне значимости на подавляющем количестве станций округа (более 95% станций), кроме февраля, когда величина  $r$  статистически достоверна лишь для 9% станций округа.

Рассмотрены структурные особенности временных аномалий атмосферного давления  $\Delta P_i$  на территории ПФО за период 1966-2009гг.

Анализ показал, что примерно 70% случаев аномалий среднемесячного АД относится к диапазону от  $-\sigma$  до  $\sigma$ , на остальные случаи (крупные, очень крупные и экстремалии) приходится примерно 30%, что соответствует нормальному закону распределения. Экстремальные ситуации встречаются редко.

Оценка продолжительности жизни аномалий (ПЖА) давления ( $\Delta P > |\sigma|$ ) показала, что наиболее вероятна величина ПЖА в 1 месяц (≈80% случаев),

около 15% аномалий имеют ПЖА  $\approx 2$  месяца и ПЖА в 3 и более месяцев наблюдаются не более чем в 5% случаев. Причем отрицательные аномалии (периоды с пониженным атмосферным давлением) имеют продолжительность жизни несколько большую, чем положительные (периоды с повышенным давлением).

Произведена оценка долговременных тенденций изменения АД с помощью рассчитанных коэффициентов наклона линейного тренда (КНЛТ) (гПа/10лет). Результаты расчетов картированы (рис. 8).

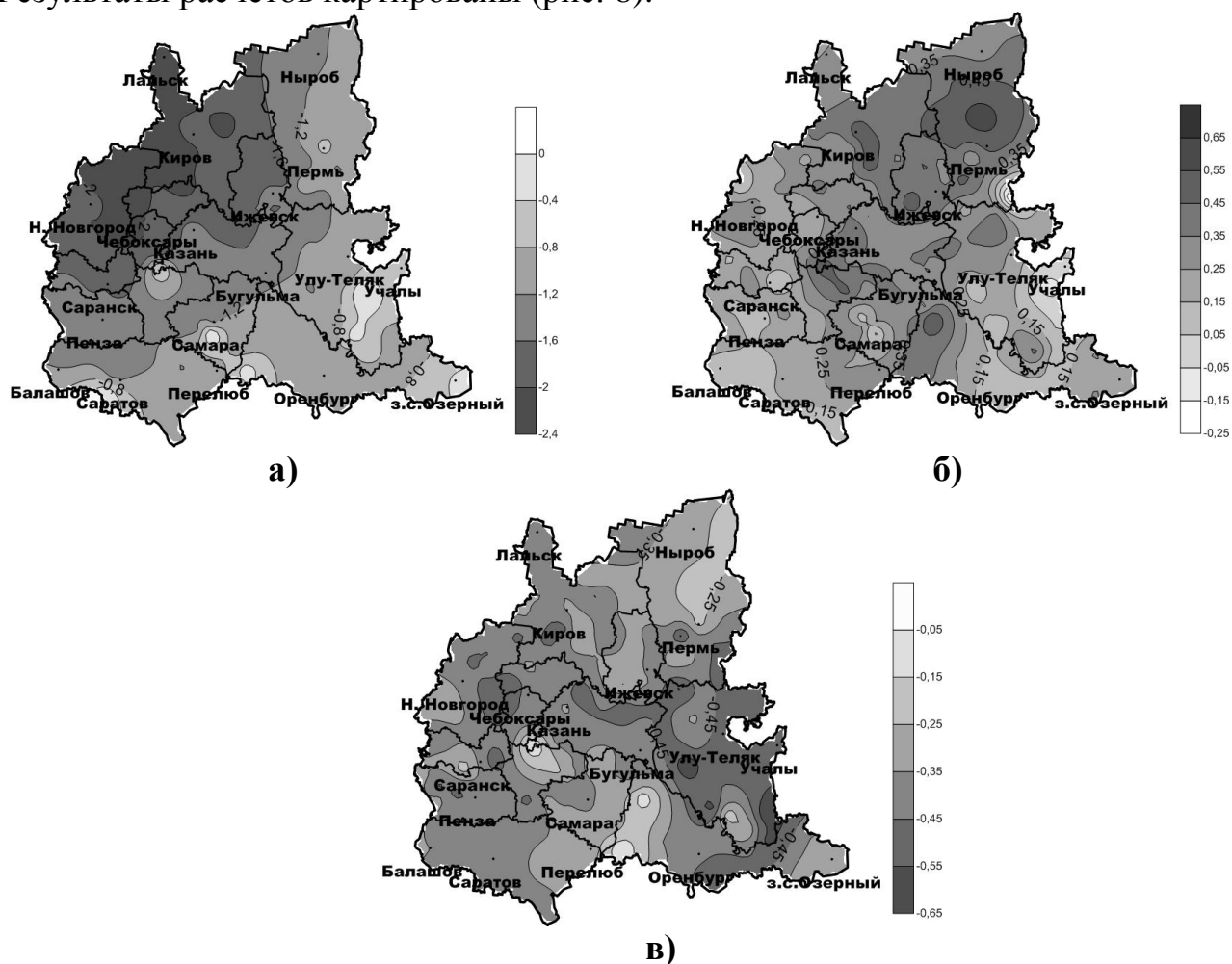


Рис. 8. КНЛТ среднемесячных значений атмосферного давления на территории ПФО, гПа/10лет: а- январь, б- июль, в- год

Анализ карт показывает, что для всей территории ПФО знак КНЛТ для годовых значений АД отрицательный, что свидетельствует о понижении атмосферного давления. Наибольшие по модулю значения КНЛТ давления наблюдаются в холодное время года на севере округа.

В заключительной части главы представлен анализ кратковременных изменений характеристик атмосферного давления, в том числе, оказывающих влияние на самочувствие человека.

**В третьей главе** последовательно рассмотрены взаимосвязи атмосферного давления на территории ПФО с рядом климатообразующих и геофизических факторов.

Выполнен поиск информативных связей атмосферного давления в ПФО с характеристиками трех центров действия атмосферы (Исландского минимума, Азорского и Сибирского максимумов), оказывающих значительное влияние на формирование погоды и климата в Европейской части России. С этой целью рассчитаны коэффициенты линейной корреляции между давлением осредненным по территории ПФО, и характеристиками ЦДА. Результаты расчетов приведены в табл. 3.

Таблица 3

Коэффициенты линейной корреляции между характеристиками ЦДА и нормированными аномалиями атмосферного давления осредненного по ПФО за зиму (1948-2010гг.)

| ЦДА                | Характеристика ЦДА | Месяц       |              |              |
|--------------------|--------------------|-------------|--------------|--------------|
|                    |                    | Декабрь     | Январь       | Февраль      |
| Исландский минимум | $\varphi$          | 0,17        | <b>-0,31</b> | -0,15        |
|                    | $\lambda$          | -0,02       | 0,04         | 0,10         |
|                    | P                  | 0,02        | <b>0,27</b>  | <b>0,38</b>  |
| Азорский максимум  | $\varphi$          | 0,03        | <b>-0,33</b> | -0,13        |
|                    | $\lambda$          | 0,16        | <b>0,37</b>  | <b>0,30</b>  |
|                    | P                  | -0,14       | <b>-0,37</b> | <b>-0,40</b> |
| Сибирский максимум | $\varphi$          | <b>0,27</b> | 0,05         | 0,20         |
|                    | $\lambda$          | 0,19        | -0,11        | -0,09        |
|                    | P                  | 0,23        | 0,00         | <b>0,29</b>  |

*Примечание: (жирным выделены значимые значения r)*

Дополнительные расчеты методом «наложенных эпох» с оценкой достоверности по критерию t-Стюдента показали, что для прогноза с нулевой заблаговременностью аномалий атмосферного давления на территории ПФО, прогностически информативными с надежностью  $P=0.95$  являются изменения атмосферного давления в центре Исландского минимума в январе и феврале, долгота расположения центра Азорского максимума в январе и феврале, а также давление в его центре для изменения февральского атмосферного давления в ПФО. С надежностью  $P=0.9$  можно считать прогностически информативными широту расположения центра Азорского максимума и давление в его центре.

С целью выявления роли положительных и отрицательных фаз индексов циркуляции атмосферы на барический режим ПФО рассмотрено влияние на них нескольких устойчивых мод, проявляющихся в поле давления во внетропических широтах: северо-атлантического колебания (NAO), скандинавского колебания (SCAND), арктической осцилляции (AO), восточно-атлантического колебания (EA). В качестве основного метода статистической обработки исходных данных был выбран композитный анализ, позволяющий



выделить чистый сигнал, соответствующий влиянию каждой отдельной ортогональной моды изменчивости на метеорологический режим региона.

Были построены поля разностных композитов приземного давления и температуры воздуха в ПФО для NAO, AO, SCAND, EA.

Показано, что наибольшее влияние как на барический режим, так и термический режим ПФО оказывает EA. Так, в поле давления сигнал на 95% уровне значимости хорошо проявляется на всей территории ПФО в январе, апреле, июле и октябре, т.е. в центральные месяцы сезонов (рис. 9). Что касается температурного поля, то исключение составляет лишь январь, когда север ПФО подвержен воздействию восточно-атлантического колебания с вероятностью 95%.

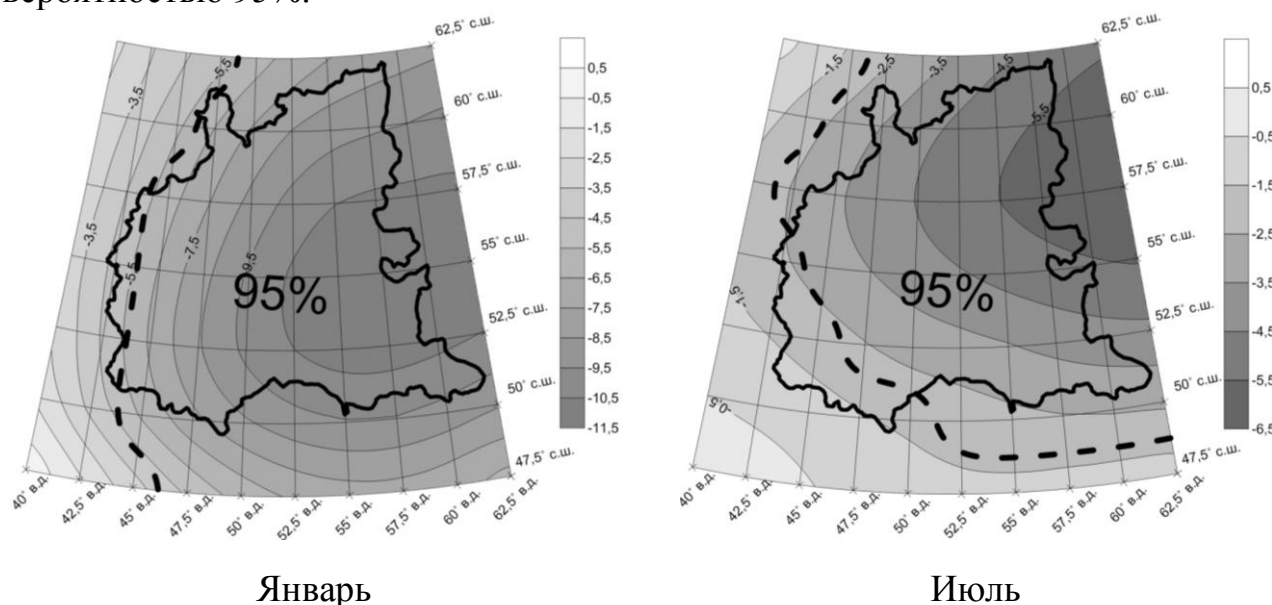


Рис. 9. Поля разностных композитов атмосферного давления на уровне моря для восточно-атлантического колебания

Исследовалась взаимосвязь изменений АД с атмосферными осадками. На основе доступных среднемесячных данных реанализа NCEP/NCAR о количестве атмосферных осадков и давлении, были построены графики хода среднемесячного давления и осадков за период 1979-2013 гг., проведен корреляционный анализ связи данных рядов. Выявлено, что межгодовые изменения количества атмосферных осадков находятся в противофазе с изменениями давления, что свидетельствует о выпадении атмосферных осадков в системе циклонов и атмосферных фронтов при понижении фоновых значений давления (табл. 4). Теснота отрицательной корреляционной связи претерпевает изменения в зависимости от территории и сезона года. Так, в среднем, связь наиболее сильная в январе, и слабая- в июле.

Таблица 4

Коэффициенты корреляции рядов среднемесячного давления и количества осадков, осредненных по ПФО

|   | I     | II    | III   | IV    | V     | VI    | VII   | VIII  | IX    | X     | XI    | XII   |
|---|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| r | -0,76 | -0,75 | -0,84 | -0,70 | -0,77 | -0,88 | -0,65 | -0,79 | -0,82 | -0,83 | -0,82 | -0,74 |

В работе предпринята попытка оценки тесноты корреляционной связи между давлением и температурой воздуха и показателями неравномерности вращения Земли в период 1966-2011гг. В результате выявлена положительная (значимая) корреляция между температурой воздуха, осредненной по Северному полушарию и рядом отклонений угловой скорости вращения Земли от многолетней нормы.

**В четвертой главе** рассмотрены особенности ветрового режима ПФО в период 1948-2013гг. и выполнены оценки ветроэнергетического потенциала округа. Показано, что на ветровой режим основное влияние оказывают сезонные особенности структуры барического поля, а также рельеф и характер подстилающей поверхности.

На территории ПФО, средние месячные скорости ветра на высоте 10-12м от поверхности земли характеризуются наименьшими значениями в летний период (1,3-4,1 м/с) и большими, как правило, в зимний (до 5,1-5,6 м/с), что обусловлено увеличением градиентов давления от лета к зиме.

Пространственная картина распределения средних скоростей ветра достаточно пестра, что определяется характером циркуляции атмосферы и рельефом местности. В июле на большинстве станций скорости на 0,9-1,3м/с ниже, чем в январе, что обуславливает годовой ход (рис. 10). Следует отметить, что в летний период в южной части округа в послеполуденные часы развивается интенсивная конвекция, способствующая усилению ветра у земли.

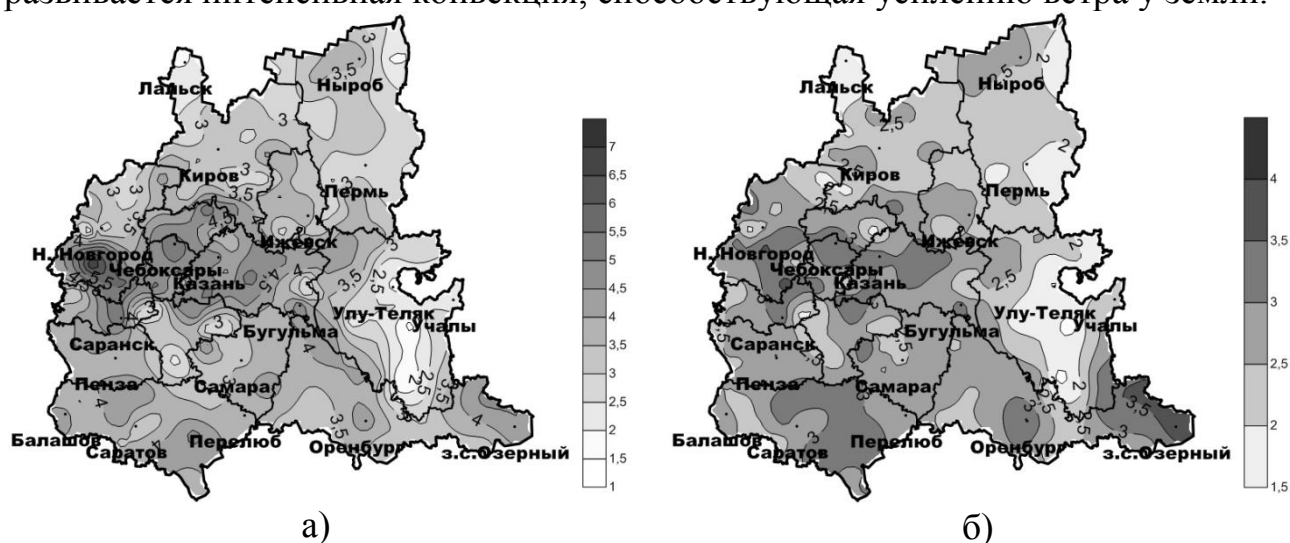


Рис. 10. Средняя многолетняя скорость ветра (м/с) на уровне флюгера: а- январь, б- июль

В течение года, местоположение очагов повышенных и пониженных значений скоростей сохраняется. На многолетней карте средней годовой скорости ветра выделяются ст. Бугульма (4,4м/с), расположенная на Бугульминско-Белебеевской возвышенности с максимальным значением и ст. Тукан с минимальным значением (1,3м/с).

Для характеристики временной изменчивости среднемесячной скорости ветра рассчитывалась величина СКО. Анализ построенных карт и таблиц

показывает, что величина  $\sigma$  меняется в годовом ходе от минимальных значений летом (0,3-0,9 м/с) до максимальных зимой, достигающих 0,6-1,7 м/с.

Для производства ветроэнергетических расчетов и оценки характеристик относительной устойчивости ветрового режима по территории ПФО рассчитывалась величина коэффициента вариации  $C_v$  (%), значения которой меняются в пределах 20-40%. Кроме того, выполнена оценка соответствия эмпирических распределений скоростей ветра теоретическим законам.

В работе выявлена временная тенденция изменения скорости ветра во времени для каждой станции путем расчета коэффициентов наклона линейного тренда ((м/с)/10лет). Анализ построенных карт показал, что для всей территории ПФО знак КНЛТ отрицательный, что свидетельствует о повсеместном ослаблении скорости ветра. Наиболее заметное ослабление ветра выявлено зимой, в январе значения КНЛТ меняются в пределах от -0,2 ((м/с)/10лет) на севере округа до -0,6 ((м/с)/10лет) на юге. Аналогичная картина складывается и в другие месяцы года. В среднем для ПФО КНЛТ среднегодовой скорости ветра составляет -0,27 (м/с)/10лет.

Для расчета ветроэнергетического потенциала (ВЭП) использовалась известная формула (Анапольская, Гандин, 1978):

$$N_{уд} = \frac{1}{2} \rho (\bar{v})^3 (1 + 3C_v^2 + AC_v^3), \quad (2)$$

где  $N_{уд}$  - удельная мощность ветрового потока,  $\rho$  - плотность воздуха,  $\bar{v}$  - средняя скорость,  $C_v$  - коэффициент вариации,  $A$  - коэффициент асимметрии.

На рис. 11 представлено распределение удельной мощности ветрового потока  $N_{уд}$ , согласно которому наилучшие условия для использования ВЭУ возникают в центральной и юго-западной частях округа, а также на юго-востоке Оренбургской области, где она достигает ~140 Вт/м<sup>2</sup>.

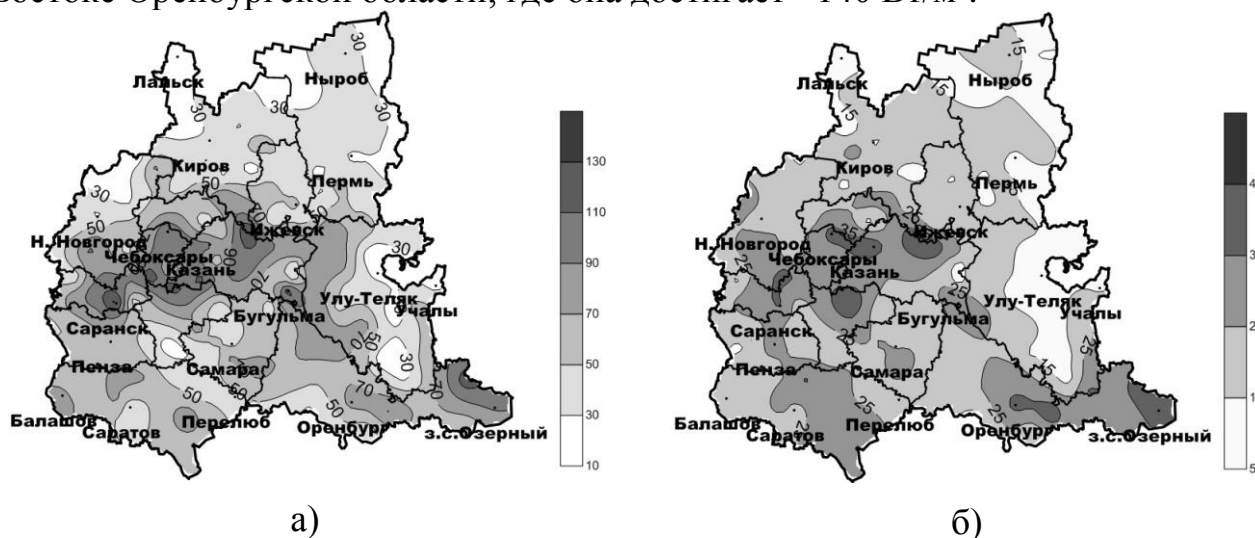


Рис. 11. Удельная мощность ветрового потока (Вт/м<sup>2</sup>) на высоте 100м: а- январь, б- июль

Согласно стандарту (ГОСТ Р 51990-200), ветроэнергетику целесообразно развивать в районах со среднегодовой скоростью  $\geq 4$  м/с, этому требованию удовлетворяют лишь выделенные на рис. 12(б) области рассматриваемого

региона. В январе соответствующая территория расширяется до 26% площади округа.

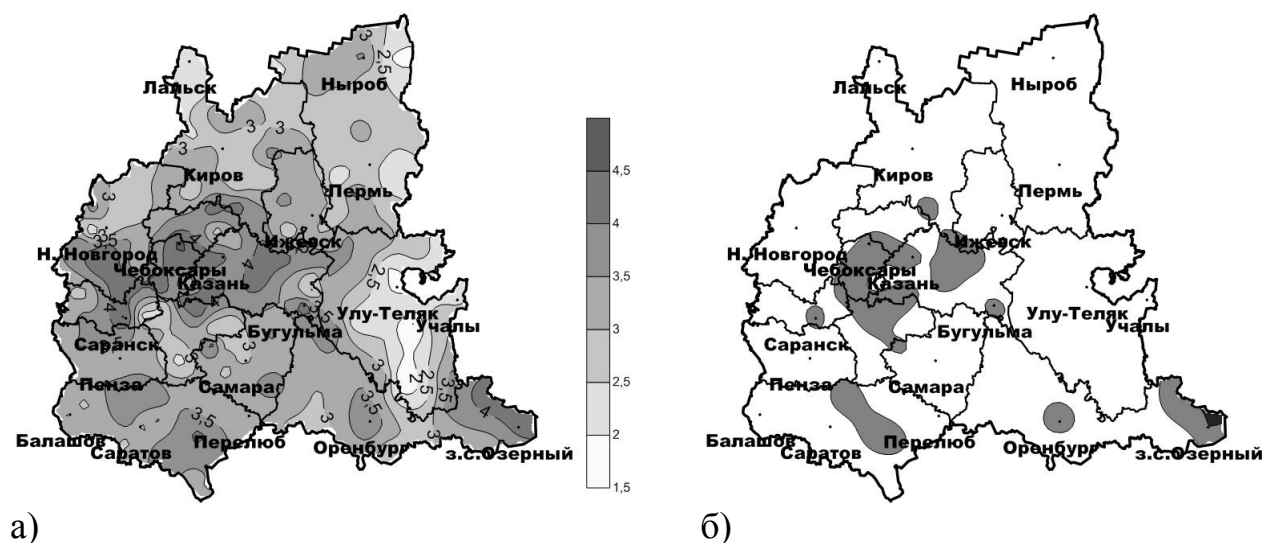


Рис. 12. Среднегодовая скорость ветра (м/с) на высоте флюгера (а), районы с  $v_{\text{ср.год}} \geq 4 \text{ м/с}$  (б)

Выполнена также оценка фактической повторяемости (в %) скоростей ветра по градациям с целью выявления общего времени выработки полезной электроэнергии и времени вынужденного простоя установки.

На основе данных срочных наблюдений рассчитана доля от общего времени, когда ротор ВЭУ будет вращаться и установка будет вырабатывать полезную электроэнергию. Для станций округа этот показатель принимает значения в диапазоне от 40 до 90% с выраженным максимумом в зимний период.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате выполненного исследования по изучению особенностей барико-циркуляционного режима Северного полушария и Приволжского федерального округа получено:

1. Оценено влияние глобального потепления на изменение полей атмосферного давления и температуры воздуха в Северном полушарии. Построены карты разностей средних значений давления и температуры за наиболее теплый 1976-2013 гг. и холодный 1948-1975 гг. периоды, выявлена очаговая структура их пространственного распределения наиболее выраженная в январе: в области Исландской и Алеутской депрессий давление понизилось на 4-7 гПа, в районе Сибирского максимума на 3 гПа. Наибольший рост температуры на 4-5 °C произошел в районе Исландской депрессии и Канадского антициклона;
2. В результате исследования низкочастотной изменчивости зональной компоненты ветра и приповерхностной температуры в широтной зоне 30-

70°с.ш. в зимний период 1948-2013гг. выявлена ведущая роль циркуляции в формировании изменчивости температуры (запаздывание хода температуры приблизительно на 8 лет). Согласно множественным коэффициентам корреляции, вклад скоростей ветра в общую дисперсию температуры в отдельных регионах превосходит 60%;

3. Исследована динамика пространственно-временных изменений поля давления на территории ПФО в период 1948-2013гг. по данным 183 метеостанций и реанализа. Выявлена тенденция понижения атмосферного давления в зимний период на 1,46 гПа/10лет и слабый рост в летний (0,32 гПа/10лет);
4. Анализ интенсивности и продолжительности времени жизни аномалий атмосферного давления по территории ПФО показал, что примерно в 70% случаев их величины по модулю не превышают значение СКО, продолжительность жизни аномалий в 80 % случаев составляет 1 месяц;
5. Кратковременные непериодические изменения давления, обусловленные циклонической деятельностью, значительно превышают по величине регулярные периодические колебания: более чем в 20% случаев межсуточные изменения превышают 8 гПа, что сказывается на состоянии здоровья человека.
6. Методом «наложенных эпох» установлено, что прогностически информативными для аномалий давления на территории ПФО являются изменения атмосферного давления в центре Исландского минимума в январе и феврале, широта и долгота расположения центра Азорского максимума, а также давление в его центре;
7. Композитный анализ показал, что наибольшее влияние как на барический, так и термический режим ПФО оказывает макроциркуляционная мода-восточно-атлантическое колебание;
8. Выявлена пространственно-временная неоднородность в распределении скоростей ветра по территории ПФО: средние значения скоростей изменяются в течение года в пределах 1,8-5,6 м/с, СКО~0,3-1,4 м/с. Наибольшие скорости ветра возникают в районе Бугульминско-Белебеевской возвышенности и в Оренбургской области. С помощью тренд-анализа установлена скорость ослабления ветровых движений по территории в течение года, достигающая в январе своего максимального значения (-0,2-0,6 ((м/с)/10лет);
9. Ветроэнергетический потенциал ПФО на уровне 100 м изменяется в течение года на территории округа в пределах 10-140 Вт/м<sup>2</sup> и определяется местными условиями и особенностями ветрового режима. Наиболее благоприятные условия для эксплуатации ветроэнергетических установок складываются в январе в центре округа, на юго-западе и на крайнем юго-востоке.

## ОСНОВНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ СОИСКАТЕЛЯ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

### *Статьи в журналах, рекомендованных ВАК:*

1. Переведенцев Ю.П. Пространственно-временные изменения атмосферного давления на территории Приволжского федерального округа за последние десятилетия / Ю.П. Переведенцев, **Т.Р. Аухадеев** // Вестник Удмуртского университета. – 2013. – №6-4. – С. 112-122.
2. Переведенцев Ю.П. Особенности ветрового режима в Приволжском федеральном округе в последние десятилетия / Ю.П. Переведенцев, **Т.Р. Аухадеев** // Вестник Удмуртского университета.-2014. №6-2.– С. 112-121.
3. Переведенцев Ю.П. О влиянии макроциркуляционных систем на термобарический режим Приволжского федерального округа / Ю.П. Переведенцев, К.М. Шанталинский, **Т.Р. Аухадеев** и др. // Ученые записки Казанского университета. Серия: Естественные науки.–2014.–Т. 156.– № 2.– С. 156-169.
4. **Аухадеев Т.Р.** Пространственно-временные изменения приземного давления воздуха в северном полушарии в период 1948-2013гг. // Ученые записки Казанского университета. Серия: Естественные науки.–2015.– Т.157.– № 3.– С. 20-35.

### *опубликованные в других изданиях:*

1. **Аухадеев Т.Р.** Барико-циркуляционный режим атмосферы // Э.П. Наумов, **Т.Р. Аухадеев**, **Ф.В. Гоголь**, В.В. Гурьянов // Климат и окружающая среда Приволжского федерального округа. – Казань: Казан. ун-т, 2013. – 254 с. [С. 54 - 75].
2. **Аухадеев Т.Р.** Особенности барического режима на территории Приволжского федерального округа / **Т.Р. Аухадеев**, Ю.П. Переведенцев // Збірник наукових праць Всеукраїнської конференції з міжнародною участю.– Киев.– 2012.– Вып. VIII.– С.98.
3. **Аухадеев Т.Р.** Особенности барического режима на территории Приволжского федерального округа // Тезисы докладов XVI международной школы-конференции молодых ученых. Состав атмосферы. Атмосферное электричество. Климатические эффекты.- Москва, 2012.– С.84-85.
4. **Аухадеев Т.Р.** Особенности барического режима Приволжского федерального округа / **Т.Р. Аухадеев**, Э.П. Наумов // Тезисы докладов

международной научной конференции по региональным проблемам гидрометеорологии и мониторинга окружающей среды.- Казань, 2012.– С.24-25.

5. **Аухадеев Т.Р.** Барико-циркуляционный режим Приволжского федерального округа // Географический вестник.-2014. № 2 (29). С. 50-59.
6. **Аухадеев Т.Р.** О влиянии макроциркуляционных систем на барический режим Приволжского федерального округа / **Т.Р. Аухадеев**, Ю.П. Переведенцев // Тезисы докладов 18-й Всероссийской школы-конференции молодых ученых «Состав атмосферы. Атмосферное электричество. Климатические процессы».– Ярославль.– 2014, 112 с.
7. Perevedentsev Y.P. Climate Trends in Barometric Circulation Regime and the Thermal State in the Northern Hemisphere and its Individual Regions / Y.P. Perevedentsev, K.M. Shantalinskiy and **T.R. Auhadeev** // Biosciences biotechnology research Asia, November 2014. Vol. II(Spl. Edn.), p. 195-201 (Scopus)
8. Переведенцев Ю.П. Климатические ресурсы как фактор возобновляемых источников энергии / Ю.П. Переведенцев, К.М. Шанталинский, **Т.Р. Аухадеев**, А.Б. Гимранова // Труды XV Международного симпозиума "Энергоэффективность и энергосбережение".– Казань, 2015.– С.234-238.